

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# МЕМБРАННІ ТЕХНОЛОГІЇ В ГАЛУЗІ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»,  
освітньої програми «Обладнання фармацевтичних та біотехнологічних виробництв»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2021

Мембранні технології в галузі. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» освітньої програми «Обладнання фармацевтичних та біотехнологічних виробництв» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: М.Ф. Калініна, М.В. Шафаренко, О.В. Воробйова. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,85 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 24 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 13.05.2021 р.)  
за поданням Вченої ради факультету біотехнології і біотехніки (протокол № 8 від 22.03.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

# МЕМБРАННІ ТЕХНОЛОГІЇ В ГАЛУЗІ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

|                         |  |
|-------------------------|--|
| Укладачі:               | <i>Калініна Мирослава Федорівна</i> , старший викладач кафедри біотехніки та інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського, канд. техн. наук<br><i>Шафаренко Микола Васильович</i> , асистент кафедри біотехніки та інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського<br><i>Воробйова Ольга Володимирівна</i> , асистент кафедри біотехніки та інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського |
| Відповідальний редактор | <i>Мельник Вікторія Миколаївна</i> , завідувач кафедрою біотехніки та інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського, д-р техн. наук, професор  |
| Рецензент               | <i>Недбайло Олександр Миколайович</i> , д.т.н., старший науковий співробітник Інституту технічної теплофізики НАН України  |

Посібник містить роз'яснення щодо виконання 2 лабораторних робіт та методики їх розрахунків, передбачених робочою програмою дисципліни «Мембранні технології в галузі». Наведено теоретичні відомості і описано методичні рекомендації по проведенню лабораторних робіт.

Для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» освітньої програми «Обладнання фармацевтичних та біотехнологічних виробництв».

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| Зміст.....  | 3  |
| Вступ.....  | 4  |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1  |    |
| Дослідження процесу первапорації .....                            | 5  |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2  |    |
| Визначення кінетики процесу сорбції на мембранних елементах ..... | 13 |
| Список використаних джерел .....                                  | 24 |

## ВСТУП

Рівень сучасної біотехнологічної та фармацевтичної промисловості впливає на всі сфери діяльності людини.

Розробка нових біотехнологічних процесів з використанням передових досягнень науки призводить до впровадження енерго – ресурсозбереження та інтенсифікації виробничого процесу.

В даний час в фармацевтичній та біотехнологічній промисловості все більш широко отримують складні термічно і хімічнолабільні органічні сполуки, відокремлюють високомолекулярні речовини від низькомолекулярних розчинників, застосовують глибоке очищення стічних вод, отримують високо очищену воду і т.д.

Потрібні «м'які» умови виробництва, яким в значній мірі відповідають мембранні процеси. Впровадження мембранних процесів дозволяє інтенсифікувати технологію концентрації біологічно активних речовин, скорочуючи при цьому втрати їх активності. Мембранні методи розділення сумішей, що містять біополімери, значно підвищують якість продукції.

Основою розробки сучасних заощаджуючих технологій є отримання і подальше удосконалення високо селективних мембран.

Метою навчальної дисципліни «Мембранні технології в галузі» є вивчення мембранних методів розділення рідких сумішей, очищення та виділення із розчинів низькомолекулярних сполук, біологічно активних речовин, вакцин, ферментів і т.д.

Для набуття навичок проведення експериментальних досліджень та обробки отриманих результатів в рамках дисципліни «Мембранні технології в галузі» проводиться студентами лабораторні роботи.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРВАПОРАЦІЇ

Мета роботи: Ознайомитись з процесом первапорації через мембрану; визначити проникність та продуктивність мембрани.

### 1 Основні теоретичні відомості

Процеси розділення рідких систем відіграють важливу роль практично в усіх сферах людської діяльності. Для здійснення цих процесів давно використовують такі способи, як перегонку і ректифікацію, абсорбцію та адсорбцію, екстракцію та ряд інших фізико-хімічних, фізичних і механічних методів. Широко застосовуваним методом розділення є розділення з використанням напівпроникних мембран (мембранні методи). Мембранні методи розділення сумішей використовуються в біотехнології, медичній, харчовій, хімічній і нафтохімічній промисловостях.

Мембраною – називають напівпроникну перегородку, яка пропускає певні компоненти рідких або газових сумішей.

До основних мембранних процесів, що нині успішно використовуються для розділення рідких систем належать: ультрафільтрування, зворотній осмос, первапорація, мембранна дистиляція та ін.

Рушійною силою мембранних процесів є градієнт хімічного (для незаряджених частинок потоку) або електрохімічного (для заряджених частинок потоку) потенціалу. Для технічних розрахунків таких процесів за рушійну силу приймають градієнт фактора, який визначає швидкість даного процесу. Таким чином основною рушійною силою мембранного процесу може бути градієнт тисків – баромембранні процеси (зворотній осмос, нано-, ультра- і мікрофільтрація); градієнт концентрацій – дифузійномембранні процеси (діаліз, первапорація, мембранне розділення газів та ін.); градієнт електричного потенціалу – електромембранні процеси (електродіаліз, електроосмос та ін.); градієнт температур – термомембранні процеси (мембранна дистиляція та ін.). В деяких мембранних процесах можливо існування двох і навіть трьох рушійних

сил. Також розрізняють мембрани за структурою: монолітні (цільні), пористі, двошарові, композиційні тощо.

Дифузійні мембрани зазвичай застосовують для розділення газів, рідких сумішей методами випаровування через мембрану. Дифузійні мембрани є практично непористим. Вони являють собою квазігомогенні гелі, через які розчинник і розчинені речовини проникають під дією градієнта концентрацій. Швидкість, з якою через мембрану проходять окремі компоненти, залежить від енергії активації при взаємодії часток які переносяться матеріалом мембрани, а також від рухливості окремих ланок мембранної матриці і від властивостей дифундуючих компонентів суміші, що розділяється. Слід зазначити, що швидкість дифузії тим вище, чим слабкіше пов'язані між собою окремі ланки полімерного ланцюга в гелевому шарі. Тому для виготовлення дифузійних мембран найбільш прийнятні полімерні ліофільні матеріали. Швидкість проходження молекул через дифузійну мембрану зазвичай прямо пропорційна коефіцієнту дифузії, який визначається розмірами молекул і їх формою. Тому дифузійні мембрани найбільш раціонально застосовувати для розділення компонентів, що мають практично однакові властивості, але розрізняються розмірами і формою молекул. Проникність дифузійних мембран майже не знижується з часом. Дифузійні мембрани мають великий гідродинамічний опір, тому їх слід застосовувати у вигляді ультратонких плівок, закріплених на пористих підкладках. У залежності від типу використовуваних мембранних апаратів як пористі, так і дифузійні мембрани виготовляють листовими, трубчастими або у вигляді порожнистих волокон внутрішнім діаметром 20 – 100 мкм при товщині стінки 10 – 50 мкм.

Первапорація - це мембранний процес, який відбувається з використанням непористих мембран для вилучення з рідкої або газової суміші домішок органічних речовин. Рушійною силою процесу первапорації є градієнт концентрації розчиненої речовини з обох боків мембрани, які створюються за рахунок різниці температур. Випаровування крізь мембрану має на меті розділення рідких сумішей, компоненти котрих мають неоднакові коефіцієнти

дифузії. Із вихідної суміші через мембрану відводяться пари перміату, які потім конденсуються. При розділенні, мембраною здійснюється сорбція розчиненої речовини, дифузія її через мембрану і наступне виділення з поверхні в газоподібну фазу, тобто пар (процес описується законами Фіка).

Продукт, який пройшов через мембрану прийнято називати *перміатом*, а затриману фазу - *ретантом* (концентратом). Розділення за допомогою мембран є результатом конкурентної взаємодії компонентів суміші з поверхнею перегородки.

Ефективність розділення можна оцінити наступними показниками:

- Селективність або коефіцієнт затримання  $\varphi$ :

$$\varphi = (1 - \frac{C_1}{C_2}) \cdot 100\%; \quad (1.1)$$

де  $C_1$  та  $C_2$  – концентрація компонентів вихідної суміші і перміату відповідно;

- Коефіцієнт розділення  $K_p$ :

$$K_p = \frac{\frac{C_{A1}}{C_{A2}}}{\frac{C_{B1}}{C_{B2}}}; \quad (1.2)$$

де  $C_{A1}$ ,  $C_{A2}$ ,  $C_{B1}$ ,  $C_{B2}$  – концентрації компонентів А і В у вихідній суміші і перміаті;

- Проникність мембрани або питома продуктивність  $g$ :

$$g = \frac{V}{F \cdot \tau} \quad (1.3)$$

де  $V$  – кількість суміші, що пройшла за час  $\tau$  крізь поверхню мембрани;

$F$  – площа поверхні мембрани;

Мембрани повинні відповідати наступним умовам:

- Мати високу роздільну здатність (селективність);
- Мати високу проникність;
- Мати хімічну стійкість до впливу розділюваної системи;
- Мати механічну стійкість достатню для її безпеки та цілісності при монтажі, транспортуванні та зберіганні.

Властивості не повинні змінюватись в процесі експлуатації

## 2 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка для дослідження процесу первапорації через мембрану, показана на рисунку 1.1. Вона складається з чотирьох основних частин, ємності 1, в яку наливається рідина, мембрана 2, через яку проходить процес первапорації, заглушки 3 та кришки 4.

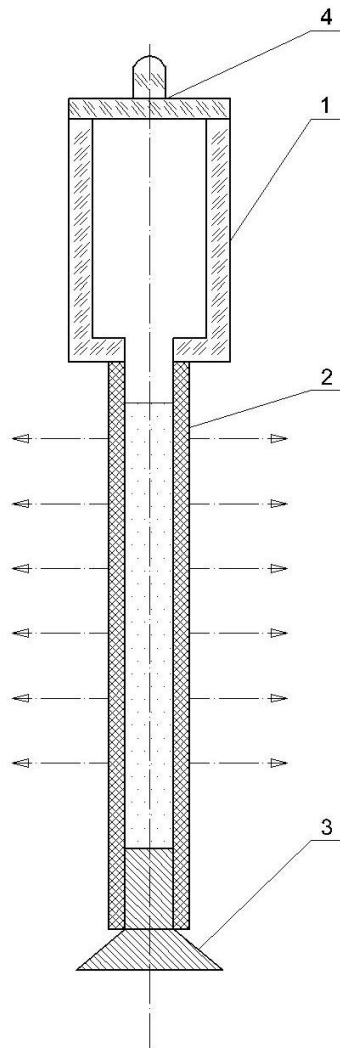


Рисунок 1.1. Схема дослідної установки

Лабораторна установка закріплюється на каркасі, який встановлюється на електронні ваги.



### 3 Порядок виконання

В даній лабораторній роботі буде проводитись дослідження процесу випаровування через мембрану з використанням дифузійних полімерних мембран. При цьому ми будемо проводити експеримент на мембранах з різною товщиною стінки. З метою виявлення залежності проникності мембрани від товщини стінки. Для більшої наочності розглянемо процес проходження через мембрану двох різних рідких вуглеводневих з'єднань, які мають різну проникність.

За допомогою лінійки та штангенциркуля вимірюємо геометричні параметри мембрани: довжину, товщину стінки та діаметри. В ємність для рідини, під витяжкою, заливається певна кількість вуглеводню (вказана викладачем) та закривається кришкою. Встановлюємо лабораторну установку на електронні ваги. Вмикаємо секундомір і вимірюємо час, за який зменшується маса установки. Дослід доводиться до тих пір, поки не стабілізується зміна маси. Дослід проводиться ще декілька разів, при зміні мембрани на іншу по товщині, матеріалу, а також для іншої рідини. Всі данні експерименту заносимо до таблиці 1.2. Вихідні дані геометричних розмірів мембран, вказані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Геометричні розміри мембран

| Товщина<br>$\delta$ , мм | Внутрішній<br>діаметр<br>$D_{\text{вн}}$ , мм | Зовнішній<br>діаметр<br>$D_{\text{з}}$ , мм |
|--------------------------|---|---|
| 1,5                      | 5,0   | 8,0   |
| 1,3                      | 5,4   | 8,0   |
| 1,0                      | 6,0   | 8,0   |

Таблиця 1.2. Результати досліджень

| Досліджувана рідина | № виміру | Температура $T, K$ | Товщина мембрани $\delta, мм$ | Довжина мембрани $l, мм$ | Час $\Delta t_c, c$ | Площа поверхні мембрани $F, м^2$ | Зменшення маси $\Delta M, г$ | Проникність мембрани $g \cdot 10^{-4}, кг/(м^2 год)$ | Продуктивність $\Delta G, кг/год$ |
|---------------------|----------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|--|-----------------------------------|
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |
|                     |          |                    |                               |                          |                     |                                  |                              |  |                                   |

Виходячи з отриманих даних розрахувати проникність мембрани, площу поверхні та побудувати графіки залежності  $g=f(\Delta\tau)$  від  $\Delta G=f(\Delta\tau)$ . Зробити висновки по роботі.

#### 4 Розрахунки та обчислення

Площа поверхні мембрани:

$$F = \pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot l \quad . \quad (1.4)$$

Проникність мембрани:

$$g = \frac{\Delta M}{F \cdot \Delta \tau} \quad . \quad (1.5)$$

Продуктивність мембрани

$$G = g \cdot F \quad . \quad (1.6)$$

#### 5 Техніка безпеки

Заходи з техніки безпеки забезпечуються наступним:

- установка повинна бути заземленою;
- забороняється вмикання установки та приладів, якщо мають місце несправності, чи не проведені необхідні регламентні роботи;
- на установці мають право працювати студенти і співробітники, які докладно вивчили будову і принцип дії установки, правила техніки безпеки, отримали відповідний інструктаж, про що розписалися в журналі.

#### Контрольні запитання

1. До яких процесів відносять процеси мембранного розділення?
2. За рахунок яких рушійних сил можуть проходити мембранні процеси?
3. Дайте визначення процесу первапорації.
4. Що є рушійною силою цього процесу?
5. Дайте визначення терміну «мембрана».
6. Які основні показники ефективності мембрани?
7. Якими основними умовам мають відповідати мембрани?
8. Що означають терміни «перміат» та «ретант»?
9. Від яких чинників, залежить швидкість процесу первапорації?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

### ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ СОРБЦІЇ НА МЕМБРАННИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Мета роботи: Вивчити конструкцію мембранної установки для проведення процесу адсорбції, принципу роботи та розрахунку процесу сорбції мембраною органічної домішки з суміші і зворотного процесу десорбції речовини з мембрани.

#### 1 Основні теоретичні відомості

Адсорбцією називають процес поглинання речовини з суміші газів, парів або розчинів поверхнею або об'ємом пор твердого тіла - адсорбенту. Речовина, яка повинна поглинатися і знаходитися в об'ємній фазі (газі, парі або рідині), називають адсорбтивом, а речовина, що поглинулась - адсорбатом.

При адсорбції виникають сили притягання на поверхні адсорбенту завдяки тому, що силове поле поверхневих атомів і молекул не урівноважене силами взаємодії сусідніх часток. За фізичною природою сили взаємодії молекул речовини, що поглинається, і адсорбенту відносяться в основному до дисперсійних, які виникають завдяки переміщенню електронів в молекулах, що зближуються. У ряді випадків адсорбції велике значення мають електростатичні та індукційні сили, а також водневі зв'язки.

Заповнення адсорбатом поверхні адсорбенту частково урівноважує поверхневі сили і внаслідок цього знижує поверхневий натяг (вільну питому поверхневу енергію). Тому адсорбція є самочинним процесом, який супроводжується зменшенням вільної енергії та ентропії системи.

Зменшення вільної енергії та ентропії системи викликає зменшення її ентальпії ( $\Delta H = \Delta G + T\Delta S, \Delta H < 0$ ), що рівнозначно виділенню тепла, тобто процеси адсорбції екзотермічні.

Процеси адсорбції вибіркові та обернені. Процес, зворотній адсорбції, називають десорбцією, яку використовують для виділення поглинених речовин і регенерації адсорбенту. Десорбція відбувається при зменшенні концентрації сорбованої речовини в середовищі, що оточує сорбент, а також при підвищенні температури. Швидкість десорбції (кількість молекул, які покидають поверхню

сорбенту в секунду, віднесене до її площі) залежить від температури, тиску, а також природи та особливостей структури сорбуючої поверхні.

Рівноважна концентрація  $X^*$  (кг/кг чистого адсорбенту) речовини, що поглинається в адсорбенті, може бути представлена у вигляді функції концентрації  $c$  і температури  $T$ :

$$X^* = f(c, T),$$

або у вигляді функції парціального тиску  $p$  і температури  $T$  у випадку адсорбції газів:

$$X^* = f_1(p, T).$$

Залежність  $X^* = \varphi(c)$  або  $X^* = \psi(p)$  при постійній температурі називають ізотермою адсорбції.

Ізотерми адсорбції зображуються кривими, форма яких визначається в основному природою адсорбату та адсорбенту і його пористою структурою. З усього різноманіття форм ізотерм для аналізу процесів адсорбції слід виділити опуклу і увігнуту (рисунок 2.1). Важливо відзначити, що початкові ділянки ізотерм лінійні.

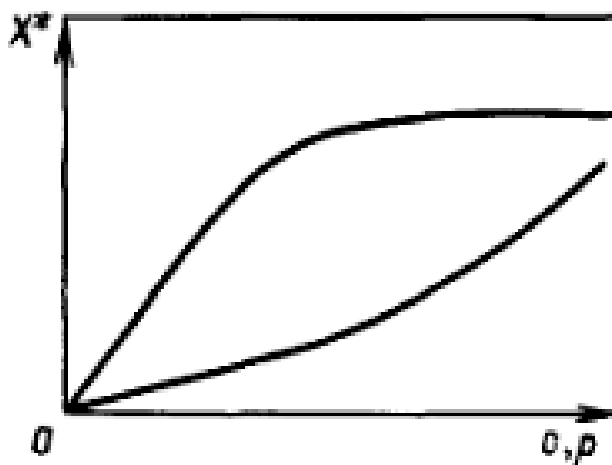


Рисунок 2.1. Опукла і увігнута ізотерми адсорбції.

Розрахунок рівноваги адсорбції багатокомпонентних сумішей особливо важливий у процесах розділення сумішей. Селективність адсорбента оцінюється коефіцієнтом  $\alpha$  розділення:

$$\alpha = \frac{y_2 x_1}{y_1 x_2},$$

де  $x_1, y_1$  та  $x_2, y_2$  – молярні концентрації у твердій та об'ємній фазі речовини, що

краще сорбується, та речовини, що сорбується гірше.

При збільшенні температури коефіцієнт  $\alpha$  розділення зменшується. Аналогічну дію на  $\alpha$  спричиняє підвищення тиску.

Часові залежності адсорбції визначаються в основному механізмом дифузії, тобто підведення адсорбтива до місця адсорбції. Якщо адсорбція на відкритій поверхні не миттєва, такий процес відбувається під зовнішньодифузійній області; при цьому закони дифузії не специфічні для адсорбції. У випадку ж пористих адсорбентів, крім зовнішньої дифузії, важливу роль починає грати внутрішня дифузія, тобто перенесення адсорбтива в порах адсорбенту при наявності в них градієнта концентрації. Механізм такого перенесення може залежати від концентрації адсорбтива й розмірів пор.

Адсорбція – загальне і повсюдне явище, що має місце завжди і скрізь, де є поверхня розділу між фазами. Найбільше практичне значення має адсорбція поверхнево-активних речовин і адсорбція домішок з газу або рідини спеціальними високоефективними адсорбентами. В якості адсорбентів можуть виступати різноманітні матеріали з високою питомою поверхнею:

1. Активне вугілля, яке складається з безлічі неупорядкованих мікрокристалів графіта, що зазвичай використовуються для поглинання органічних речовин у процесі розділення рідин і газів. Питома поверхня активного вугілля велика і складає  $6 \cdot 10^5 - 17 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Основним недоліком активного вугілля є горючість та невисока механічна міцність.

2. Силікагелі – зневоднені гелі кремнієвої кислоти, які використовують для адсорбції полярних з'єднань. До переваг силікагелів відносяться їх негорючість та міцність, більша за міцність активованого вугілля. Однак вони мають низьку питому продуктивність. При наявності вологи різко знижується поглинаюча здатність по відношенню до пари органічних речовин.

3. Цеоліти – це природні або синтетичні мінерали, які являють собою водні алюмосилікати, що містять оксиди лужних и лужноземельних металів. Особливістю цеолітів є те, що адсорбційні поверхні з'єднані між собою вікнами певного діаметру, крізь які можуть проникати тільки молекули меншого розміру.

Також у якості адсорбентів використовують інші групи природних мінералів і синтетичних речовин. Адсорбенти характеризуються високою поглинаючою, чи адсорбційною, здатністю, яка визначається концентрацією адсорбтива в одиниці маси чи об'єму адсорбента. Величина поглинаючої здатності залежить від типу та структури адсорбента, природи речовини, яка поглинається, її концентрації, температури тощо. Слід відмітити, що для всіх адсорбентів після проведення процесу стає важливим питання виділення сорбованої речовини та відновлення адсорбенту.

Деякі властивості найрозповсюдженіших сорбентів приведені у таблиці 2.1.

Слід відмітити, що сорбенти повинні мати такі властивості:

- Велика адсорбційна здатність - поглинання великої кількості адсорбтива при малій його концентрації у фазі;
- Висока селективність по відношенню до цільового компоненту;
- Хімічна інертність по відношенню до компонентів суміші, що розділяється;
- Здатність до регенерації (відновленню);
- Висока механічна міцність;
- Низька вартість; доступність.

Цим вимогам у повній мірі відповідають мембранні матеріали в якості сорбентів.

В даній лабораторній роботі в якості адсорбента використовується насадка з мембранних елементів у формі полих циліндрів, висота яких приблизно дорівнює діаметру, що є оптимальним відношенням для досягнення максимальної поверхні масообміну.

Синтетичні полімерні мембрани і мембранні процеси вивчають більше 100 років. Однак тільки 40 років тому, коли перші синтетичні мембрани стали комерційним матеріалом, з'явилися можливості для реалізації їх технічного використання. Мембрани можуть бути використані в різних процесах розділення, а порівняльна простота і енергетична ефективність мембранних процесів роблять майбутнє мембранної технології досить багатообіцяючим. В останні роки інтерес до цієї області підвищився. Широкого впровадження цих методів для очищення і

розділення різних розчинів пов'язані з екологічною безпекою та енергетичною ефективністю струмових процесів.

Таблиця 2.1. Властивості сорбентів

| Сорбенти                   |                  | Питома<br>поверхня<br>, м <sup>2</sup> /г | Розмір<br>гранул<br>, мм | Насипна<br>щільність<br>, г/м <sup>3</sup> | Особливості  |
|----------------------------|------------------|---|--------------------------|--|--|
| Активо-<br>ване<br>вугілля | вугілля<br>«БАУ» | 600 -<br>1700                             | 1-5                      | 350  | Краще поглинає пари органічних речовин, ніж води, однак з підвищенням вмісту вологи в активованому вугіллі його здатність поглинати пари органічних речовин знижується. Вони застосовуються зазвичай для рекуперації летючих розчинників. Недоліком активованого вугілля є його горючість. |
|                            | вугілля<br>«СКТ» |   | 1,5-2,7                  | 380-450                                    |  |
| Силікагелі                 |                  | 400 - 770                                 | 0,2 - 7                  | 100-800                                    | Використовуються в основному для сушки газів. Поглинальна здатність силікагелів по відношенню до парів органічних речовин сильно знижується в присутності вологи. Перевагою силікагелів є їх негорючість та більша механічна стійкість порівняно з активним вугіллям                       |



| Сорбенти | Питома<br>поверхня<br>, м <sup>2</sup> /г | Розмір<br>гранул<br>, мм         | Насипна<br>щільність<br>, г/м <sup>3</sup> | Особливості  |
|----------|---|----------------------------------|--|--|
| Цеоліти  | Відпо-<br>відно до<br>речовини            | 2-5                              | Відпо-<br>відно до<br>речовини             | Проявляють молекулярно-ситову дію. Цеоліти відрізняються високою поглинальною здатністю по відношенню до води та є високоефективними адсорбентами для сушки та очищення газів та рідин, зокрема для глибокого висушування газів, з невеликим вмістом вологи.   |
| Іоніти   | Інфор-<br>мація<br>відсутня               | Інфор-<br>мація<br>від-<br>сутня | Інфор-<br>мація<br>відсутня                | Практично не розчинні в воді, а також в звичайних розчинниках та володіють рухливими іонами, здатними обмінюватися на еквівалентну кількість іонів.<br>Представляють собою як природні, так і синтетичні неорганічні та органічні речовини. Зміненням складу активних груп при синтезі іонообмінних смол можливо отримати іоніти з досить різними властивостями. |

Даний процес можна розглядати як дифузійний процес масопереносу через мембрану, кінетика якого описується законом молекулярної дифузії – першим законом Фіка. Маса речовини, яка продифундувала, пропорційна градієнту концентрацій, площині, що перпендикулярна напрямку дифузійного потоку і часу.

$$dM = -D \cdot dF \cdot d\tau \cdot \frac{dc}{dn} \text{ або } M = -D \cdot F \cdot d \cdot \frac{dc}{dn}.$$

Для здійснення процесу дифузії необхідно, щоб довжина вільного пробігу молекул була більшою ніж діаметр пор мембрани, тобто частота зіткнень молекул газу зі стінками пор перевищувала частоту взаємних зіткнень молекул. Оскільки середні швидкості молекул у співвідношенні з кінетичною теорією газів обернено пропорційні квадратному кореню їх мас, компоненти суміші, що розділяється, проникають через пори мембрани з різними швидкостями. В результаті перміат збагачується компонентом з меншою молекулярною масою, а реатант (концентрат) - з більшою. Коефіцієнт розділення суміші:

$$K = \frac{n_1}{n_2} = \left( \frac{M_2}{M_1} \right)^{0,5},$$

де  $n_1$  і  $n_2$  - число молів компонентів з молекулярними масами відповідно  $M_1$  і  $M_2$ .

В реальних умовах досить важко за допомогою пористих мембран забезпечити чисто кнудсеновський механізм розділення компонентів. Це пояснюється адсорбцією або конденсацією їх на стінках пор мембрани і виникнення додаткового конденсаційного або поверхневого, газового потоку, наявність якого приводить до зниження  $K$ .

У випадку використання непористих мембран розділення газів проходить за рахунок різної швидкості дифузії компонентів через мембрани. Для таких мембран проникність на 2-3 порядку нижче, ніж для пористих, але селективність значно вище.

Процес проникнення речовини через непористу полімерну мембрану складається з наступних основних стадій: 1) сорбція компонента на поверхні мембрани зі сторони розділяючої суміші; 2) дифузія компонента через мембрану;

3) десорбція компонента з іншої сторони поверхні мембрани.

Відношення швидкостей дифузії чистих речовин через непористі полімерні плівки добре співпадає з співвідношенням швидкостей дифузії цих же речовин в їх сумішах. Таким чином, значення швидкості проникнення чистих речовин через різноманітні мембрани можуть використовуватися для попереднього вибору матеріалу мембрани. При цьому варто мати на увазі те, що речовини, природа яких схожа з хімічною природою полімера, проникають через нього швидше.

Зі збільшенням температури величина питомої продуктивності  $G$  для непористих мембран зростає, однак при цьому, як правило, знижується селективність  $\phi$ , яку в першому наближенні можна представити як співвідношення коефіцієнтів проникності чистих компонентів суміші, що розділяється.

Адсорбція на мембрані представляє собою взаємодію іонів і молекул розчинених речовин з матеріалом мембрани на її поверхні і на стінках пор, що приводить до зміни параметрів масопереносу через мембрану.

Мембранні матеріали володіють високою вибірковою здатністю. Використані в лабораторній роботі мембранні елементи є дифузійними. Швидкість, з якою у мембрану проникають окремі компоненти, залежить від енергії активації при взаємодії часток, що переносяться, з матеріалом мембрани, а також від рухомості окремих ланок мембранної матриці та від властивостей дифундуючих компонентів суміші, що розділяється. Слід відмітити, що чим слабкіше зв'язані між собою окремі ланки полімерного ланцюга матеріалу мембрани (тобто, чим більше мембрана набухає), тим більша швидкість процесу. Мембранні матеріали характеризуються тим, що можуть адсорбувати до 5 своїх об'ємів. Це слід враховувати при заповненні камери установки мембранними елементами.

Таблиця 2.2. Основні переваги і недоліки мембранної та адсорбційної технологій

| Спосіб   | Переваги   | Недоліки  |
|--|--|---|
| 1. Адсорбція                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Дешеві вуглецеві матеріали, цеоліти, силікагель</li> <li>• Ефективні прості технології</li> <li>• Висока чистота для легкого компоненту</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Потрібні: регенерація, реактивація адсорбенту, енерговитрати на регенерацію</li> <li>• Невисока ступінь вилучення</li> <li>• Перервні процеси</li> </ul>                             |
| 2. Дифузійне розділення (мембранна технологія) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Можна використовувати як проміжну стадію для видалення основної кількості домішок</li> <li>• Безперервний процес</li> <li>• Простота, компактність устаткування</li> <li>• Швидкий вихід на робочий режим</li> <li>• Простота регенерації мембрани</li> <li>• Порівняно низькі енерговитрати на здійснення процесу</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Недостатня селективність (низька чистота при високих ступенях вилучення компонентів)</li> <li>• Низька продуктивність</li> <li>• Втрата тиску для проникаючого компонента</li> </ul> |

Відзначимо, що і мембранні, і адсорбційні методи відносяться до молекулярно-селективних процесів і не містять в собі енерговитрат на фазові переходи.

При проведенні лабораторної роботи крізь насадку з мембранних елементів пропускають суміш, що розділяється. При цьому, в залежності від швидкості сорбування мембраною окремих компонентів суміші, необхідно проводити цю операцію декілька разів для того, щоб досягти максимального розділення суміші.

## **2 Техніка безпеки**

Заходи з техніки безпеки забезпечуються наступним:

- установка повинна бути заземленою;
- забороняється вмикання установки та приладів, якщо мають місце несправності, чи не проведені необхідні регламентні роботи;
- на установці мають право працювати студенти і співробітники, які докладно вивчили будову і принцип дії установки, правила техніки безпеки, отримали відповідний інструктаж, про що розписалися в журналі.

## **3 Порядок виконання**

В даній лабораторній роботі проводяться дослідження процесу адсорбції мембранними елементами метилхлориду та ацетону.

3.1 Перед початком проведення досліду, необхідно нарізати мембранні елементи з розмірами

- Внутрішній діаметр 5 мм;
- Зовнішній діаметр 8 мм;
- Висота 8 мм.

3.2 Зважуємо на електронних вагах певну кількість мембранних елементів.

3.3 Засипаємо мембранні елементи в мірний циліндр з пробкою і зважуємо на вагах.

3.4 Заливаємо в мірний циліндр метилхлорид або ацетон та вмикаємо секундомір.

3.5 Через певний проміжок часу виливаємо з циліндра розчинник та зважуємо мірний циліндр з мембранними елементами.

3.6 Повторюємо п.п. 3.4-3.5

Дані дослідів записуються в табл. 2.3

Таблиця 2.3. Результати вимірювання

| №<br>п/п | Реагент       | Маса<br>сорбента,<br>М, г | Час<br>$\Delta\tau$ ,<br>сек | Маса<br>сорбенту з<br>адсорбатором,<br>$G_1$ , г | Маса<br>сорбенту з<br>адсорбатором,<br>$G_2$ , г | Маса<br>адсорбата,<br>$\Delta G$ , г | Поглинаюча<br>здатність,<br>$m_g$ |
|----------|---------------|---------------------------|------------------------------|--|--|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 1        | Метиленхлорид |                           |                              |  |  |                                      |                                   |
| 2        |               |                           |                              |  |  |                                      |                                   |
| 3        |               |                           |                              |  |  |                                      |                                   |
| 4        |               |                           |                              |  |  |                                      |                                   |
| 5        |               |                           |                              |  |  |                                      |                                   |
| 6        |               |                           |                              |  |  |                                      |                                   |
| 1        | Ацетон        |                           |                              |  |  |                                      |                                   |
| 2        |               |                           |                              |  |  |                                      |                                   |
| 3        |               |                           |                              |  |  |                                      |                                   |
| 4        |               |                           |                              |  |  |                                      |                                   |
| 5        |               |                           |                              |  |  |                                      |                                   |
| 6        |               |                           |                              |  |  |                                      |                                   |

### 3 Методика обробки експериментальних даних

1. Експериментальні результати заносяться в таблицю 2.3

2. Для процесу розрахунку маси сорбата за час  $\Delta\tau$ :

$$\Delta G = G_1 - G_2$$

3. Поглинаюча здатність сорбента розраховується по формулі:

$$m_g = \Delta G / M.$$

4. За розрахунковими даними будується графік залежності:

$$m_g = f(\tau)$$

## Контрольні запитання

1. Що таке адсорбція?
2. Від чого залежить швидкість десорбції?
3. Як називають залежність  $X^* = \varphi(c)$  або  $X^* = \psi(p)$  при постійній температурі?
4. Як зменшити коефіцієнт розділення  $\alpha$  ?
5. Які матеріали можуть виступати в якості адсорбентів?
6. Що таке цеоліти?
7. Які властивості повинні мати сорбенти?
8. Що собою представляє адсорбція на мембрані?

## Список використаних джерел

### Основна

1. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 1. – М.: Химия. 1995. – 400 с. ISBN 5–7245–1006–5.
2. Дытнерский Ю. И., Быков И, Р., Акобян А. А. и др. «Разделение жидких смесей испарением через мембрану и мембранной дистилляцией». М.: НИИТЭХим., 1989.
3. А.М. Поляков. «Некоторые аспекты первапорационного разделения жидких смесей» / Критические технологии. Мембраны, 2004, 4, №24, 29-32.
4. Дытнерский Ю.И., Быков И.Р. Испарение через мембрану как альтернатива азеотропной ректификации. // Хим. Пром., 1989.
5. Проектирование процессов и аппаратов пищевых производств. Под ред. В. Н. Стабникова. К.: «Вища школа», 1982. - 800 с.
6. Касаткин А. Г, Основне процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. – 750 с.
7. Ю.М. Пласкин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин, Процессы и аппараты пищевых производств. М: «Колосс», 2007. – 760с.